维普资讯 http://www.cqvip.com

第10卷 第4期 生 态 学 报 Vol.10, No.4
1990年12月 ACTA ECOLOGICA SINICA Dec., 1990

二维土壤蒸发过程的数值分析

杨邦杰 陈镜明
（中国科学院生态环境研究中心，北京） （中国科学院地理研究所，北京）

摘 要

本文从研究耕作措施出发，提出了地表平坦或地表起伏不平时二维土壤蒸发过程的数值分析方法。作为应用举例，分析了沟种垄作对苗床土壤水分与温度分布的影响，并作了田间试验验证。这一研究为农业生态学提供了一种定量分析方法。

关键词：土壤，蒸发过程，数值分析。

土壤-大气界面上水分与能量的交换过程——蒸发过程，影响土壤的温度与湿度，从而影响其它的物理过程、化学过程与生物学过程。这一现象是农业生态学的基础问题。国外对蒸发现象的研究主要集中在一维问题上，例如大片均匀的耕地、草场、水面的蒸发。我们曾经提出了一维土壤蒸发过程的数值分析方法[1]。然而，要定量分析不同的耕作措施对土壤水热运动的影响，以及不同的水热状态对种子发芽出苗的影响，一维模型是不够的。要分析苗床土壤的水热状态，就必须研究二维蒸发过程的数值分析方法。

一、地表平坦的二维土壤蒸发过程的数值模型

对于少耕法所形成的地表平坦的苗床，已耕与未耕土壤的孔隙度不同而有不同的水热运动参数。可用有限元法把土壤剖面分成若干个均质单元，按一维土壤蒸发过程的数值分析方法[1]，计算表层每一单元的表面温度与蒸发率，从而计算土壤的水分与温度分布。以下着重讨论沟垄上的蒸发过程。

二、沟垄上的空气动力学阻力

耕作形成的沟垄可用下面的方程来描述其边界形状（图1）。

$$z = h + h \cdot \cos(\pi x / W) \qquad (1)$$

其中：W为沟宽；$h = H/2$，H是垄高；W'是垄宽。图中虚线为理想的沟垄形状，实线为实际形成的形状。

本文从应用的角度出发，提出一套半理论半经验公式来分析沟垄上的空气动力学阻力。

1. 当风向垂直于沟垄走向时（图2），表面上坐标为(x, z)处的空气动力学阻力可用下式计算：

$$r_a(x, z) = u_z / u_*^2(x, z) \qquad (2)$$

其中u_z是参考高度Z处的风速，$u_*(x, z)$为(x, z)处的摩擦风速。

本文于1990年2月2日收到。

$$u_*(x,\ z)=\frac{ku_5(x,\ z)}{\ln(0.05/Z_0)} \tag{3}$$

其中k为von Karman常数，$u_5(x,\ z)$是沟垄上$(x,\ z)$处上面0.05m处的风速，Z_0是地表粗糙度系数。我们用热线风速仪在田间测定沟垄上若干点的风速，以及2m高处的风速u_r，拟合了下面的公式来计算u_5：

$$u_5(x,\ z)=[a+b(d\cdot H/W)^c\cos(\pi x/W)]\cdot u_r \tag{4}$$

其中a，b，c，d为拟合参数。

2. 当风向与沟走向平行时(图2)，当作平地处理处理，只修正参考高度：

$$r_a(x,\ z)=[\ln(Z_e(x,\ z)/Z)]^2/(k^2u_r) \tag{5}$$

其中Z_e是修正的参考高度：

$$Z_e=Z-h\cdot\cos(\pi x/W) \tag{6}$$

3. 当风向与沟垄走向成一角度时（图2），可以认为风刮过了更宽的沟垄，修正宽度为：

$$W_t=W/\sin\gamma \tag{7}$$

其中γ是风向与沟走向之间的夹角。第(1)式中x坐标修正为：

$$X_t=x/\sin\gamma \tag{8}$$

则空气动力学阻力的计算仍按(2)—(4)式进行。当$\gamma<15°$时，则认为风平行于沟走向。

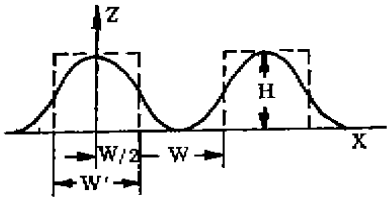

图 1 沟垄形状的数学描述
Fig 1 Mathematical description of a furrow

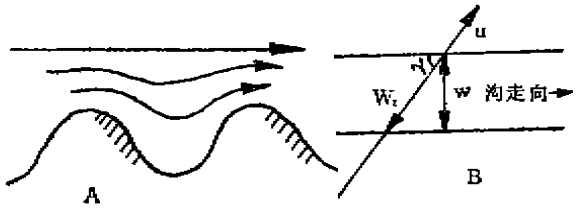

图 2 风向与沟垄走向的相对位置
A. 风向垂直于沟走向，B. 风向与沟走向成一角度
Fig.2 The relationship between the wind direction and the furrow azimuth
A. Wind direction perpendicular to the furrow
B. Wind direction across the furrow

三、沟垄上蒸发率的计算

把地表分成若干段，每段为一个单元，其中点坐标为$(x,\ z)$，蒸发率的计算是在每个单元上进行的。某时刻t沟垄上$(x,\ z)$处的蒸发率为：

$$E_s(x,z,t)=\frac{H_s(x,z,t)-H_a(t)}{r_a(x,z,t)+r_s(x,z,t)} \tag{9}$$

其中H_s(kg/m³)是$(x,\ z)$处地表空气的绝对湿度，H_a(kg/m³)是参考高度Z处的空气绝对湿度。r_s是土壤表面蒸发阻力[2]。

$$r_s(x,z,t)=r_a(x,z,t)\cdot S_t \tag{10}$$

S_t是稳定度修正系数[1]。

$$H_s(x,z,t)=H_0\cdot\exp[\psi g/R(T_s+273,16)] \tag{11}$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

其中 H_s(kg/m³)是空气在温度T_s下的饱和湿度，ψ为地表土壤的水势，R是通用气体常数，g是重力加速度。地表温度T_s的计算在下面讨论。

四、土壤表面温度的计算

从(9)式可知，要计算地表(x, z)处的蒸发率，必须知道地表温度$T_s(x, z, t)$。

1. 沟垄上的辐射分析　在起伏的地表上，各处的能量状态随时间以及沟垄形状与位置的变化而不同。沟垄上(x, z)处在某时刻 t 的总辐射为：

$$R_g(x,z,t) = S_{\alpha\beta} + R_d \tag{12}$$

其中R_d为散射辐射，$S_{\alpha\beta}$为直接辐射。沟垄上(x, z)的直接辐射用下式计算[3]：

$$S_{\alpha\beta} = S_m[\sin(h_0)\cos\alpha + \cos(h_0)\sin\alpha\ \cos(A-\beta)] \tag{13}$$

其中 α 为坡度角，β 为坡的方位角，h_0 为该时刻的太阳高度角，A 为太阳的方位角。如果(x, z)处于遮阴区，则：

$$R_g = R_d \tag{14}$$

2. 地表温度的计算　同地表平坦的情形一样，把地表分为若干段，每段为一均质单元。上面的辐射分析是对每一单元进行的。求出每一单元瞬时的总辐射之后，则可按一维问题的数值分析方法逐次求地表每一单元的表面温度，整个地表的温度是用分段的温度值表示的。

五、土壤中水分与温度分布的有限元分析

土壤蒸发率 $E_s(x, z, t)$ 与地表温度 $T_s(x, z, t)$ 并不能独立计算，必须与供水介质（土壤）中瞬态的水分与温度分布同时联立求解。分析土壤瞬态的水分与温度分布是本项研究的主要目的。

1. 控制方程

土壤中水热运动的基本方程可以根据传热传质的基本理论并加以修正来建立。本文以Philip方程[4,5]为基础，修改为以基质势为变量的方程组：

$$C_w\frac{\partial\psi}{\partial t} = \nabla\cdot(K_w\nabla\psi) + \nabla\cdot(D_T\nabla T) - \frac{\partial K}{\partial z} \tag{15}$$

$$C_t\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla\cdot(\lambda\nabla T) + \rho_l L\nabla\cdot(K_v\nabla\psi) \tag{16}$$

其中 ψ(m)为土壤水的基质势，T(℃)为土壤温度，t(s)为时间，C_w(m^{-1})是比水容量，C_t(J/m³·℃)是土壤热容量，K(m/s)为导水率，D_T,(m²/s·℃)为与温度梯度有关的水汽扩散率，λ(J/m·s·℃)为导热率，ρ_l,(kg/m³)为液态水密度，L(J/kg)是水的汽化潜热，K_v,(m/s)是水汽在基质势ψ梯度下的当量导水率。

方程组(15)、(16)是一组非线性耦合的偏微分方程组，在土壤-大气界面上应满足的边界条件为：

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$-K_w\frac{\partial\psi}{\partial n}-D_T\frac{\partial T}{\partial n}=E_s(x,\ z,\ t) \tag{17}$$

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}=\rho_l L K\frac{\partial\psi}{\partial n}=S(x,\ z,\ t) \tag{18}$$

其中 n 为边界的法向，$S(x,\ z,\ t)$为边界上$(x,\ z)$处 t 时刻的热通量[1]。计算区域的两侧（图 3 ）可以假定无水热交换，下边界条件要根据具体情况进行分析。初始条件为土壤 ψ与T 已知：

$$\psi=\psi(x,\ z)\qquad t=0 \tag{19}$$

$$T=T(x,\ z)\qquad t=0 \tag{20}$$

2. 控制方程的有限元解

方程组(15)—(20)可用有限元法求解[6]。计算机程序用 C，FORTRAN 以及数据库语言写成。图 3 是分析土壤二维蒸发过程以及水分温度分布的有限元网格。

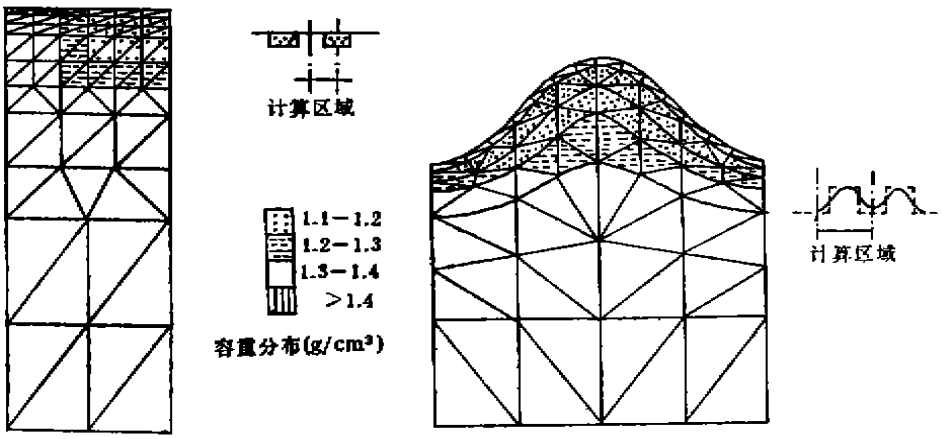

图 3 分析少耕(左)与沟种垄作(右)所形成的苗床土壤水分与温度分布时所采用的有限元网格

Fig.3 The finite element grid for analyzing seedbed soil moisture and temperature of the minimum-till pattern (left) and the ridge and furrow (right)

六、田间试验

1. 试验设计

模型验证的田间试验于1987年 4 月春播期间在中国科学院禹城综合试验站(山东)进行。耕整地后按常规平播、沟种垄作以及用少耕法播种棉花，进行了 7 天的测定。测定项目如下：

（1）土壤温度 地表用红外测温仪测定，同时用地温表测5，15，20，40，80，120，140cm深处的温度。

（2）土壤水分 表层0—1，5，10，20cm处的水分取土用烘干法测定，30—150cm 处的含水量用中子水分仪测定。

维普资讯 http://www.cqvip.com

（3）辐射　测总辐射、直接辐射与散射辐射。

（4）2m 高的风速、空气温度与湿度。

（5）地表比辐射率　白天每两小时采样一次，晚上三小时采样一次。

2.　计算值与实测值的比较

以上分析方法可以定量计算不同耕作方法形成的苗床土壤的水分与温度分布。图4—5列出了垄上与沟中表面与 5 cm 深处的水分温度的实测值与计算值。20cm以下实测值与计算值几乎完全重合。这一模型比较正确地表达了苗床土壤水分与温度的动态变化规律。

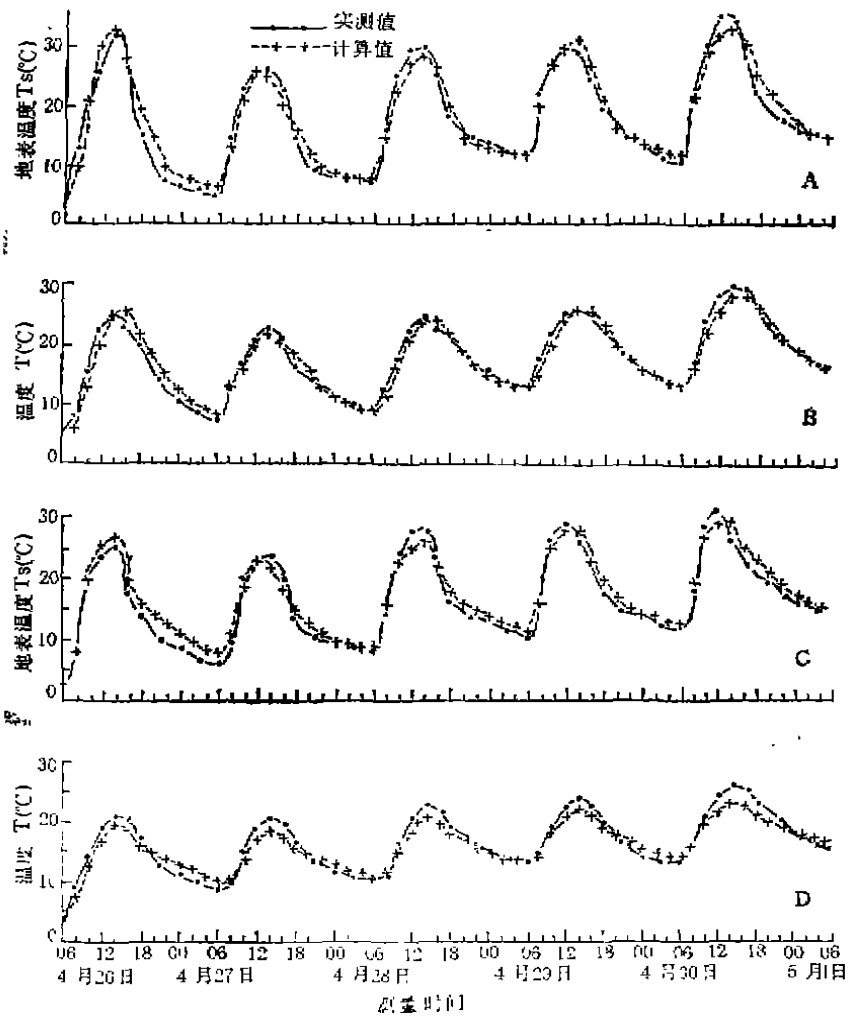

图 4　沟垄表面与 5cm深处温度实测值与计算值比较

A 图：测点为垄表面土壤；　B 图：测点距垄表面 5cm深处；

C 图：测点为沟表面土壤；　D 图：测点距沟表面 5cm深处。

Fig. 4　The comparison of measured and calculated temperature at the surface and the depth of 5 cm in the ridge and furrow

维普资讯 http://www.cqvip.com

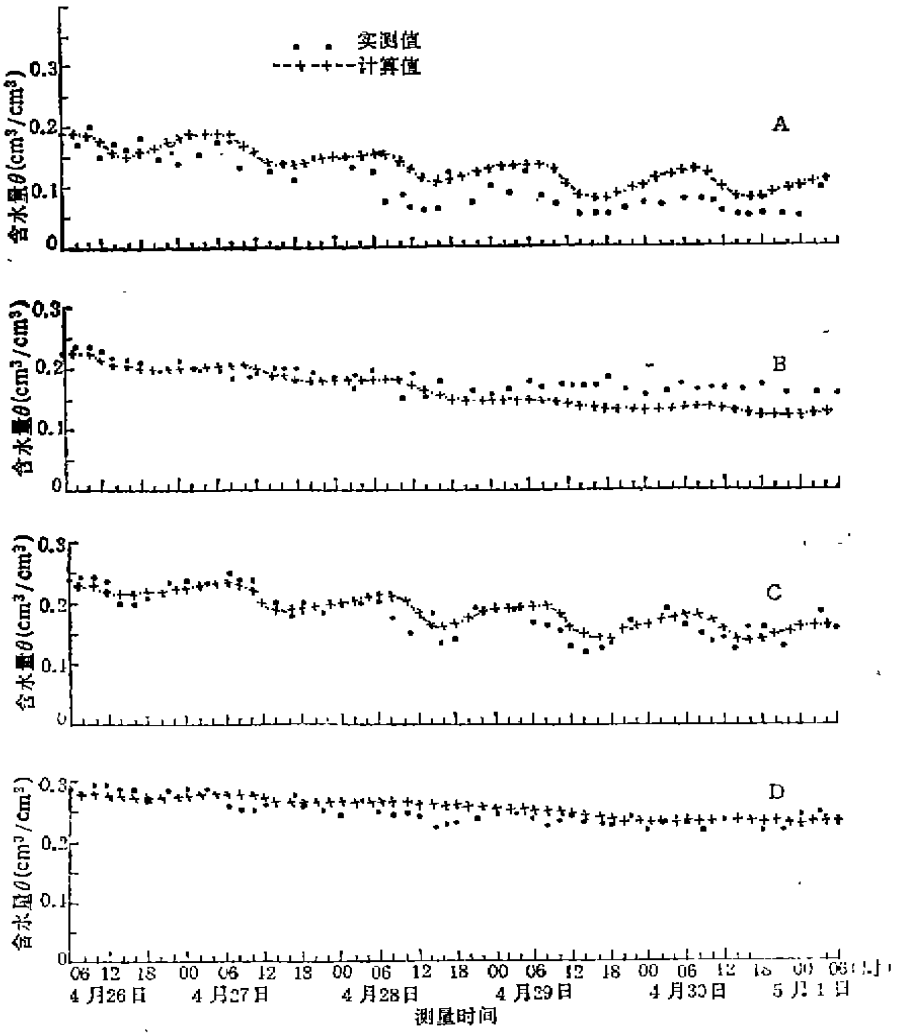

图 5 沟垄表层0—1cm与5cm深处水分实测值与计算值比较

A 图：测点为垄表层 0—1cm深； B 图，测点距垄表层 5cm深；

C 图：测点为沟表层 0—1cm深； D 图，测点距沟表层 5cm深。

Fig.5 The comparison of measured and calculated moisture content at the depth of 0—1 and 5 cm in the ridge and furrow

七、应用举例

我们用这一方法分析了不同的耕作方法对土壤水分与温度变化规律的影响，以便为不同地区、不同环境条件下的耕作方法研究提供定量分析方法。图 6—7 列出了不同的沟深(或垄高)、不同的沟走向对土壤水分与温度分布的影响，这样可以根据农艺要求来选择耕作方式与技术指标。

维普资讯 http://www.cqvip.com

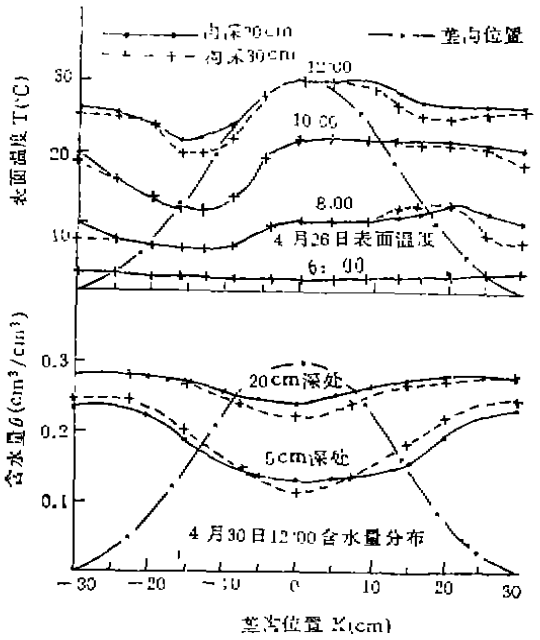

图 6 不同的沟深(或垄高)对表面温度与含水量的影响

Fig.6 The simulated soil temperature and moisture content as influenced by different depth of furrows

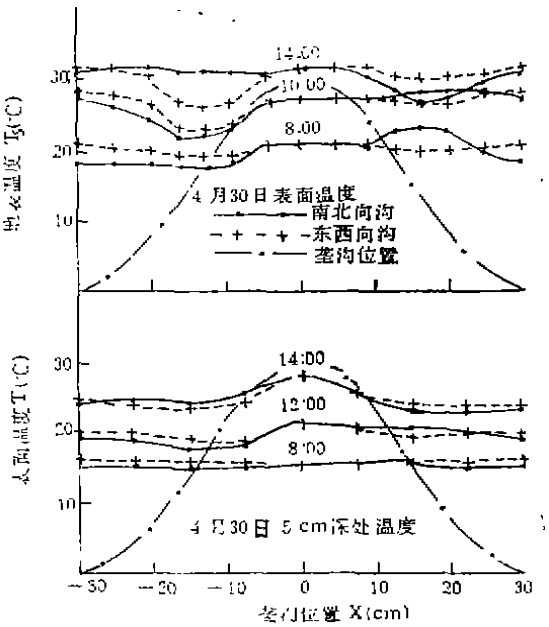

图 7 不同的沟走向对土壤温度的影响

Fig.7 The simulated soil temperature distribution as influenced by different azmuth of furrows

八、结　　论

1. 本文从研究耕作措施出发，提出了二维土壤蒸发过程的数值分析方法。对地表平坦的二维问题，考虑到非均质土壤的水热运动参数不同；对起伏不平的沟垄，考虑对辐射与风的影响，提出了计算表面温度与蒸发率的方法。蒸发率与地表温度并不能独立计算，必须与土壤中水分与温度的瞬时值联立求解。本文采用有限元法求解不规则边界、非均质土壤中水热运动的非线性耦合偏微分方程组，实现了二维土壤蒸发过程的数值分析，并作了田间试验验证。

2. 这一方法能模拟分析不同环境条件下、不同耕作方法所形成的土壤构造对水分与温度变化过程的影响，为农业工程、农业生态学提供了一种定量分析手段。同时，对环境、地理、气象、水利、水文方面的定量分析也有应用前景。

参 考 文 献

〔1〕杨邦杰、曾德超、唐登银、谢贤群，1988，裸地蒸发过程的数值模拟，地理学报 43(4)：352—362。

〔2〕Camillo, P.J., et al, 1986, A Resistance Parameter for Bare Soil Evaporation Models, *Soil Science* 141(2)：95—105.

〔3〕翁笃鸣、陈万隆、沈觉成、高家表，1981，《小气候和农田小气候》，第6—9页，农业出版社。

〔4〕Philip, J.R., et al, 1957, Moisture Movement in Porous Materials Under Temperature Gradients, *Trans. Am. Geophys. Union* 38(2)：222—232.

维普资讯 http://www.cqvip.com

[5] de Vries, D.A., 1958, Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media. *Trans. Am. Geophys. Union* 39(5):909—916.
[6] Neuman, S.P., et al, 1975, Finite Element Analysis of Two-dimensional Flow in Soil Considering Water Uptake by Roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 39:224—230.

TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSIS FOR EVAPORATION PROCESS OF THE BARE SOIL

Yan Bangjie
(*Research Center for Eco-Environmental Sciences, Academia Sinica, Beijing*)
Chen Jingming
(*Institute of Geography, Academia Sinica, Beijing*)

Soil moisture and temperature of the seed zone in dry land farming are mainly affected by the surface evaporation and the structure of seedbed. A two-dimensional numerical model of evaporation from the surface of flat or undulated heterogeneous soil was developed and validated by field experiment for the purpose of optimizing tillage operations.

When the surface is flat, the different evaporation rate from each surface element can be ccalculated using finite element method based on one-dimensional evaporation model by considering the different physical parameters of the heterogeneous seedbed soil. When the surface is not flat, the undulation of ridge and furrow affects the radiation and wind speed. Considering the change in energy balance and aerodynamic resistance, the surface temperature and evaporation rate from the surface of ridge and furrow can also be calculated using finite element method.

Based on the governing equations of heat and moisture transfer in heterogeneous soil and the evaporation model developed by the author, a simulation program for the influence of tillage operations on seedbed moisture and temperature behavior was compiled and validated by experiment field data. As an illustration, the seedbed soil moisture and temprature behavior as affected by ridge and furrow tillage was analyzed using the model.

In conclusion, this study renders a better understanding to the complicated soil evaporation processes and provides a new method for research in tillage method and quantitative analysis in agroecosystems.

Key words: bare soil, evaporation, numerical analysis.